

# **PENGARUH GELOMBANG TEGANGAN SURJA HUBUNG BERSILASI SATU-ARAH PADA TEGANGAN GAGAL SELA UDARA PENDEK**

*The Effect of Uni-Directional Oscillatory Switching Surge  
Waves on The Breakdown Voltages of Short Air Gaps*

**Jannus Maurits Nainggolan<sup>1</sup>, T. Haryono<sup>2</sup>, Tumiran<sup>2</sup>.**

Program Studi Teknik Elektro  
Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

## **ABSTRACT**

Breakdown on air gaps with oscillatory switching surges need to be tested continuously to get deeper knowlegdes of the phenomena and breakdown pattern of air gaps by this switching surge.

Tests with switching surges having short gaps with four wave shape of uni-directional switching surges, with frequencies of 10-khz, 20-khz, 31-khz, and 47,5-kHz were done to see the effect of those switching surges on breakdown voltages (alterations and the differences) of various air gaps. Air gaps tested were rod-rod gap, rod-sphere gap, sphere-plate gap, and plate-sphere gap, horizontally mounted, on both polarity of voltage, with gap-spacing of 17-mm and 25-mm. The shape of switching surge was previously obtained by simulation and circuit mathematical analysis. The breakdown voltage of air gap was obtained with Up & Down method then corrected by circuit efficiency constant.

No significant effect on alteration of breakdown voltage values of testing air gaps, on both of gap-spacing, by increasing of frequency of switching surges from 10 kHz to 47,5-kHz. Breakdown voltages of rod-rod gap showed smaller values compared with sphere-plate results reaching a value of 57,17 kV. Breakdown voltages on positive polarity of rod-sphere gap were bigger than the negative ones, and those difference values were the biggest, because it field characteristic is more a-symmetrical

<sup>1</sup> Fakultas Teknik Universitas Lampung

<sup>2</sup> Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

and non-uniform. This is contradictory with the ordinary results that breakdown voltages of negative polarities have bigger values, and become patterns on sphere-plate and plate-sphere configurations.

**Key words :** *air gaps, uni-directional oscillatory switching surges, breakdown voltages*

## PENGANTAR

Pada suatu sistem tegangan ekstra tinggi, EHV (*Extra High Voltage*), surja hubung yang dihasilkan oleh operasi *switching* pada sistem, merupakan salah satu elemen penting yang harus diperhatikan secara serius dalam kontinuitas pelayanan jaringan listrik, karena jenis tegangan transien ini merupakan penyebab banyaknya terjadi kegagalan koordinasi isolasi, kerusakan-kerusakan dan gangguan-gangguan lain dalam sistem daya listrik. Pada tingkat tegangan ini, surja hubung sangat berbahaya, khususnya karena amplitudonya sangat tinggi yang dapat mencapai beberapa kali tegangan frekuensi daya, medan listrik pada sistem menjadi *non-uniform* yang umumnya menghasilkan tegangan gagal yang lebih rendah pada sistem.

Surja hubung dihasilkan oleh proses *switching*, misalnya ketika sebuah pemutus daya (*circuit breaker*) menutup atau memukul ulang (*restrikes*), *switching* pada rangkaian kabel, bank kapasitor, dan reaktor shunt, atau karena induktans yang dimiliki oleh trafo, mesin, atau jaringan. Karena kapasitans, induktans, resistans, dan rugi-rugi pada suatu sistem, surja hubung umumnya menjadi lebih kompleks, berosilasi, dan sering memiliki lebih dari satu frekuensi yang bertindih, dan boleh jadi berbentuk osilasi *uni-directional* (osilasi satu-arah) dan/atau *bi-directional*. Osilasi ini akan berhenti pada resistansi dan rugi-rugi lain pada sistem yang mengurangi transien ke nol, sampai suatu keadaan tunak dicapai, ketika tegangan operasi normal.

Udara adalah media isolasi gas yang paling umum digunakan pada jaringan daya karena ia bebas, berlimpah-limpah, dan dapat memulihkan (memperbaiki) keadaan sendiri setelah suatu kegagalan. Udara digunakan sebagai suatu isolator (bahan penyekat) pada jaringan daya tegangan tinggi, baik tegangan ekstra tinggi pasang luar (*outdoor*) maupun pasang dalam (*indoor*). Untuk isolasi, udara digunakan untuk menyediakan isolasi fase-ke-fase, fase-ke-menara,

atau fase-ke-tanah. Sebagai tambahan, udara digunakan juga untuk sela *chopping*, sela percik, dan sela pengukuran. Karakteristik gagal listrik udara adalah sangat penting bagi para perancang dan operator peralatan tegangan tinggi

Karena *range* yang luas aplikasi peralatan pada jaringan daya, elektroda-elektroda pada sistem itu yang normalnya digunakan pada komponen-komponen yang terisolasi udara memiliki keragaman bentuk yang luas. Untuk mengetahui dan mengevaluasi karakteristik gagal listrik udara pada komponen-komponen atau bagian-bagian jaringan itu bisa didapatkan dengan simulasi di laboratorium melalui pemodelan. Ternyata, banyak kasus yang dapat dimodelkan dengan beberapa konfigurasi elektroda sederhana. Pada bagian jaringan yang mengisolasi fase-fase; yang secara mendetail bagian ini menyediakan isolasi diantara 2 fase pada jaringan transmisi, bagian jaringan dapat dimodelkan sebagai elemen konduktor-konduktor. Contoh lain adalah bagian jaringan yang berupa sela protektif tegangan tinggi, yang berfungsi untuk melewati surja tegangan tinggi ke tanah melalui sebuah peluahan percikan. Simulasi bagian jaringan ini dapat dimodelkan dengan elektroda batang-batang

Dengan maksud untuk menaksir atau menilai ketahanan isolasi pada suatu sistem, surja hubung standar secara luas telah digunakan untuk menyimulasi tegangan lebih surja hubung pada sela-udara, isolator string, tanduk busur dan lain-lain. Namun, bentuk surja ini telah dibuktikan tidaklah cukup/memenuhi, sehingga surja non-standar (yang memang sering terjadi pada sistem) telah dikenalkan, dan bahkan telah banyak digunakan khususnya dalam mengklarifikasi sifat isolasi berbagai konfigurasi sela udara. Gelombang tegangan surja hubung beresilasi adalah salah satu jenis surja non-standar yang telah mendapat penerimaan luas.

Couper dkk (1988) menyatakan bahwa kapasitans, induktans, resistans dan rugi-rugi pada suatu sistem, akan memodifikasi surja hubung menjadi surja yang beresilasi pada suatu frekuensi tertentu tergantung pada nilai parameter-parameter itu. Sering terdapat lebih dari satu frekuensi. Penelitian dilakukan pada sela udara/elektroda batang-bola yang terpasang vertikal dengan terpaan surja hubung beresilasi satu-arah dan dua-arah dengan beberapa nilai/bentuk penurunan osilasi. Jika surja beresilasi satu-arah, ada efek polaritas yang jelas sehingga tegangan gagal surja positif memiliki nilai lebih rendah.

Beberapa bentuk surja hubung telah ditemukan, yaitu surja eksponensial, surja berosilasi teredam, dan surja dengan kenaikan secara linear. Penelitian yang menggunakan puluhan bentuk gelombang ini menyimpulkan bahwa relasi di antara tegangan gagal 50% dan waktu puncak pada suatu spasi/jarak sela dapat dinyatakan sebagai kurva cekung (kurva U) dan titik minimum pada kurva bergeser ke sebelah kanan, yaitu ke daerah waktu puncak yang lebih lama dan pertambahan jarak sela.

Bentuk elektroda mempengaruhi sifat atau karakteristik tembus sela udara, baik dengan isolator string maupun tidak, di antara elektroda-elektroda itu, dengan pengujian memakai gelombang surja hubung. Pengaruh ini tidak terlalu tampak pada pengujian dengan gelombang surja petir. Penelitian dilakukan terhadap belasan bentuk elektroda yang terpasang vertikal (seperti batang-bidang, batang-batang, konduktor-bidang, dan konduktor-batang). Ternyata, elektroda batang-bidang (*rod-plane*) memiliki tegangan gagal terendah (Paris dan Cortina, 1968).

Chowdhuri dkk (1994), dalam penelitiannya menggunakan delapan bentuk gelombang petir yang umumnya non-standar, terhadap tiga bentuk sela udara yang beragam, menemukan bahwa level tegangan gagal maksimum mencapai sebuah titik minimum pada sebuah rentang waktu muka spesifik surja petir non-standar. Dengan terpaan gelombang non-standar tadi, tidak ada ketegasan bahwa dengan bertambahnya waktu muka akan terjadi kenaikan tegangan gagal; tetapi sebaliknya dengan penurunan waktu ekor, ada kecenderungan penurunan sedikit tegangan gagal.

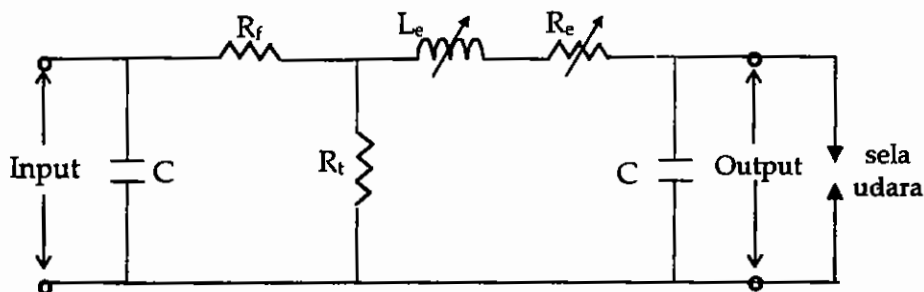
Pada banyak laboratorium indoor dan outdoor, percobaan-percobaan bahkan yang berbiaya besar telah dan terus dilakukan dengan maksud untuk menentukan tegangan gagal sela udara. Setelah mekanisme-mekanisme gagal ini dimengerti secara keseluruhan, karakteristik gagal pada sela udara yang panjang diketahui mengikuti pola yang sama seperti sela-sela yang kecil (*small gaps*).

Suatu pengertian terhadap mekanisme kegagalan dasar akan membantu mengurangi biaya yang dibutuhkan pada percobaan berskala besar dan interpretasi yang sesuai dengan hasil-hasil eksperimen. Oleh sebab itu, penelitian terhadap sifat ketahanan isolasi sela udara pendek dengan beberapa jenis konfigurasi elektroda yang dimensinya beragam, perlu dilakukan, terlebih lagi dengan terpaan tegangan surja hubung berosilasi satu-arah dengan berbagai frekuensi gelombang.

Berdasarkan uraian diatas, maka dilakukan penelitian ini yang ditujukan untuk mengetahui pengaruh gelombang tegangan surja hubung bersilasi satu-arah pada sela udara pendek, meliputi hal-hal berikut : a) pola tegangan gagal pada setiap sela udara /konfigurasi elektroda (yang terpasang secara horizontal) dengan terpaan gelombang tegangan surja hubung bersilasi dengan berbagai frekuensi osilasi ( $\leq 50$  kHz), pada jarak yang pendek (17-mm dan 25-mm), b) pola perbedaan tegangan gagal antara gelombang polaritas positif dan polaritas negatif pada kedua jarak sela itu, dan c) perbedaan pertambahan tegangan gagal pada setiap konfigurasi elektroda dengan kenaikan jarak sela sebesar 50%.

## CARA PENELITIAN

Penelitian dan pengujian dilakukan pada empat (4) bentuk konfigurasi elektroda, yaitu: konfigurasi batang-batang, konfigurasi batang-bola, konfigurasi elektroda bola-piring dan konfigurasi elektroda piring-bola. Elektroda batang terbuat dari besi putih bulat yang memiliki ujung berbentuk segi empat yang berukuran 12,5-mm<sup>2</sup>. Elektroda bola terbuat dari bahan kuningan, yang memiliki permukaan halus dengan diameter 62,5 mm. Elektroda piring juga dari bahan kuningan yang berdiameter 100 mm yang bagian tepinya sangat halus dan melengkung dengan ketebalan 20 mm. Rangkaian penelitian ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian pengujian elektroda (sela udara)

Dengan peralatan-peralatan bantu (induktor, resistor, pengukur suhu, pengukur waktu) serta alat-alat di laboratorium, diuji keempat sela itu dengan empat bentuk frekuensi gelombang surja hubung bersilasi satu-arah yang dihasilkan oleh generator impuls/surja pada laboratorium.

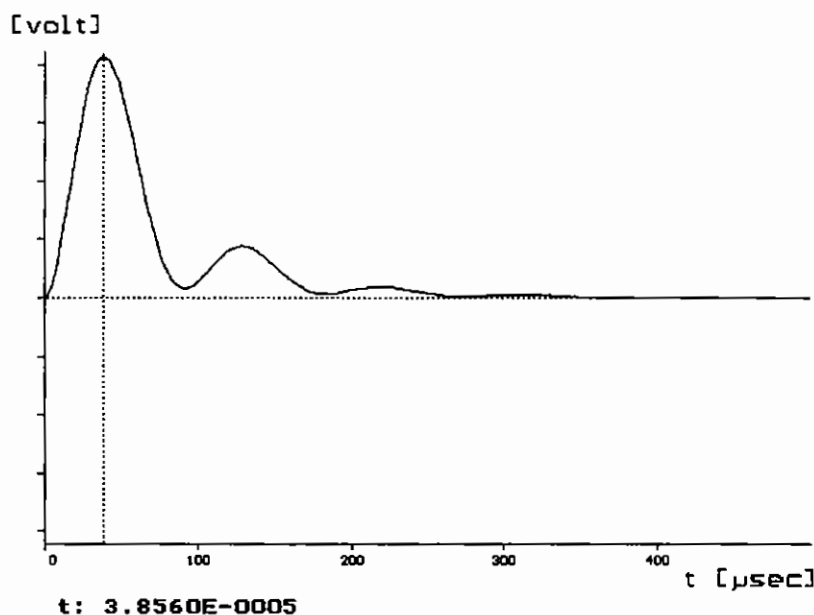
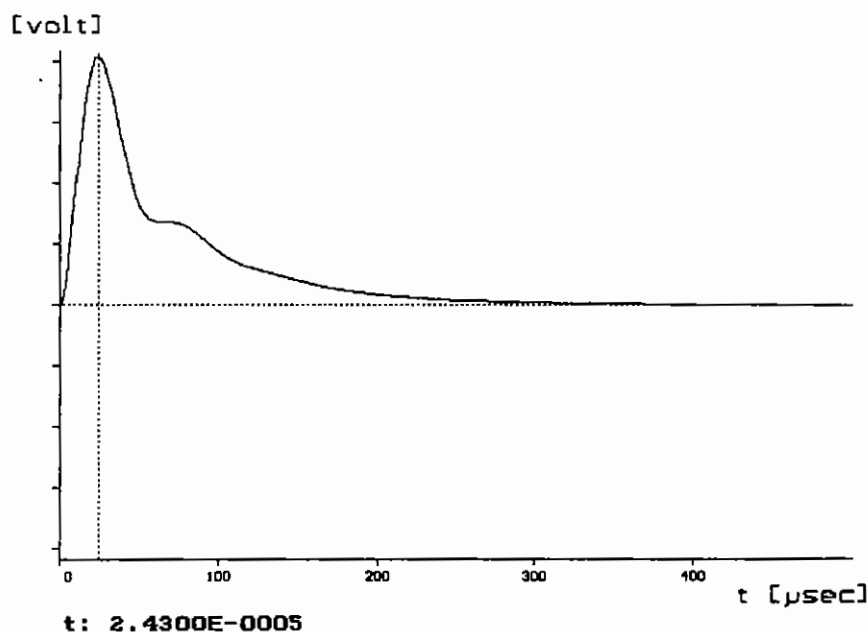
Tiap-tiap konfigurasi elektroda akan dibebani atau diterpa dengan gelombang tegangan surja bersilasi yang diperoleh sebelumnya dengan simulasi EMTP/analisis Excel. Pada kedua polaritas tegangan, positif-negatif, dan pada 2 buah jarak sela, elektroda diterpa dengan tegangan impuls sebanyak 40 kali, dengan jarak antara terpaan tegangan ke-1 dan berikutnya diberikan durasi 25 detik untuk mengurangi efek ionisasi atau pengaruh pelucutan sebelumnya. Untuk menghindari rentang tegangan (batas atas-batas bawah) yang sangat besar, maka tegangan awal pengisian kapasitor dicari dengan metode tersendiri. Penelitian menggunakan Metode Up & Down (Arismunandar, 1994) untuk mendapatkan tegangan gagal sela udara. Tegangan gagal ini dikoreksi dengan faktor koreksi udara, yang kemudian dikoreksi lagi dengan faktor efisiensi tegangan (bentuk hubungan elemen rangkaian penelitian menghasilkan faktor efisiensi rangkaian yang berbeda).

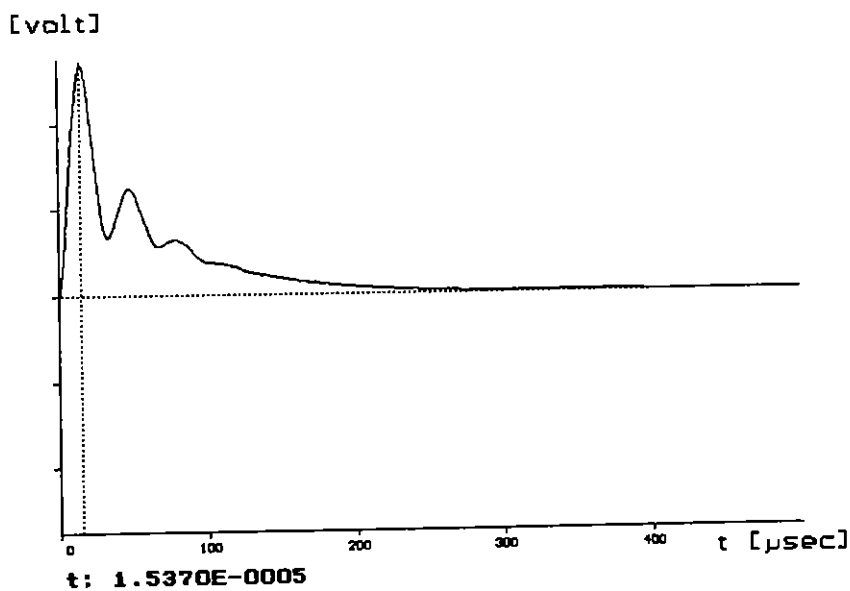
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan simulasi menggunakan EMTP dan analisis matematis (Ms. Excel) terhadap elemen rangkaian dapat ditentukan lebih dahulu frekuensi gelombang surja bersilasi (Tabel 1). Bentuk gelombang surja hubung bersilasi satu-arah hasil simulasi memakai EMTP ditunjukkan pada gambar 2 sampai gambar 5. Bentuk gelombang ini adalah simulasi bentuk gelombang output pada rangkaian penelitian (menggunakan *voltage divider*/pembagi tegangan).

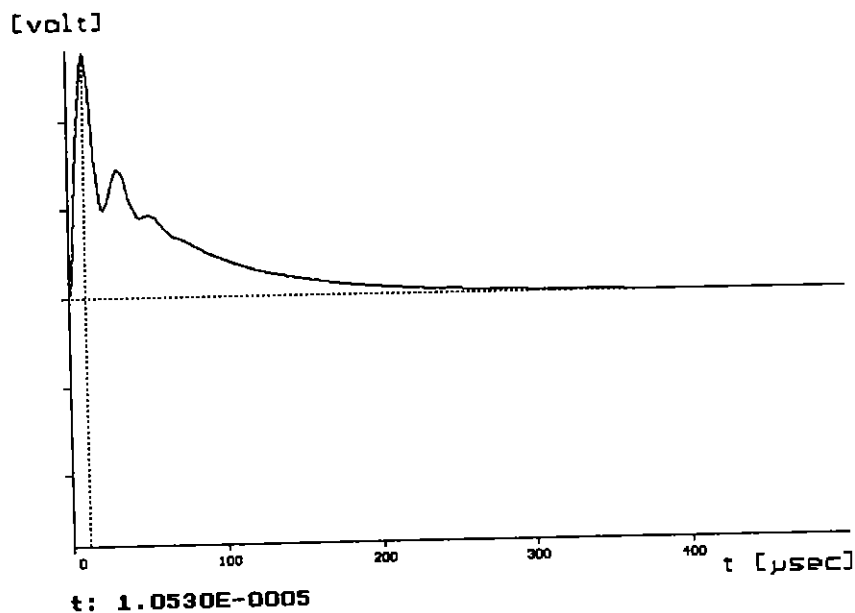
**Tabel 1. Frekuensi gelombang surja hasil EMTP/analisis Ms. Excel untuk tiap set elemen rangkaian ( $R_f=80\ \Omega$ ,  $R_r=824\ \Omega$ )**

Le (mH)	rd (ohm)	Re (ohm)	Cx (pF)	Cs (uF)	f (kHz)
22,894	9,7	600	10.000	0,0625	11,1
7,881	3,0	600	10.000	0,0625	21,9
2,998	0,9	150	10.000	0,0625	31,1
1,338	0,5	100	10.000	0,0625	46,7

Gambar 2. Gelombang surja hasil simulasi EMTP dengan  $f = 11,1\text{-kHz}$ Gambar 3. Gelombang surja hasil simulasi EMTP dengan  $f = 21,9\text{-kHz}$



Gambar 4. Gelombang surja hasil simulasi EMTP dengan  $f = 31,1\text{-kHz}$



Gambar 5. Gelombang surja hasil simulasi EMTP dengan  $f = 46,7\text{-kHz}$



Dengan penyederhanaan rangkaian, nilai (besaran) frekuensi dapat dicari dari elemen rangkaian pada tabel 1 secara kalkulasi memakai persamaan :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (1)$$

dengan,  $C = \frac{C_s \cdot C_x}{C_s + C_x}$

Dari *ouput* bentuk gelombang hasil peneltian (output osiloskop), didapat nilai frekuensi gelombang hasil percobaan, yang menjadi frekuensi acuan pada analisis selanjutnya. Kedua frekuensi di atas diperbandingkan dengan frekuensi hasil analisis matematis / hasil simulasi (telah diperoleh pada tabel 1). Dalam tabel 2 ditunjukkan perbedaan (% error) nilai frekuensi hasil penelitian dengan hasil analisis matematis Ms.Excel / simulasi EMTP serta frekuensi hasil kalkulasi.

**Tabel 2. Perbedaan (% error) frekuensi gelombang impuls hasil pengujian dengan hasil analisis matematis serta hasil kalkulasi**

Urutan	f(kHz) A	f (kHz) B	f (kHz) C	Error-1 (± %)	Error-2 (± %)
$f_1$	10,0	11,1	11,3	- 9,90	-11,50
$f_2$	20,0	21,9	19,4	- 8,68	+ 3,09
$f_3$	31,0	31,1	31,3	- 0,32	- 0,96
$f_4$	47,5	46,7	46,9	+ 1,71	+ 1,28

dengan, A = Nilai frekuensi hasil pengujian; frekuensi gelombang output osiloskop (sebagai frekuensi acuan).

B = Nilai frekuensi hasil analisis matematis dengan simulasi EMTP/analisis Ms. Excel.

C = Nilai frekuensi hasil kalkulasi menggunakan persamaan (1).

Error-1 = Nilai % error frekuensi hasil pengujian terhadap frekuensi hasil analisis matematis Ms. Excel.

Error-2 = Nilai % error frekuensi hasil pengujian terhadap hasil kalkulasi dengan persamaan (1).

Dari percobaan dengan terpaan tegangan impuls hubung berosilasi tunggal (gambar 2 sampai gambar 5) dengan metode Up & Down dan faktor efisiensi tegangan, dihasilkan tegangan gagal surja 50% ( 50% SOV) dari tiap-tiap konfigurasi sela elektroda pada setiap jarak sela, 17-mm dan 25-mm. Seluruh tegangan gagal 50% itu dihimpun pada tabel 3 sampai tabel 6.

**Tabel 3. Tegangan gagal 50% (50% SOV) konfigurasi batang-batang**

Frekuensi (kHz)	s=17-mm		s=25-mm	
	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)
10,0	27,12	26,93	40,13	39,92
20,0	26,83	27,25	40,24	40,71
31,0	25,37	25,53	38,78	38,49
47,5	25,63	25,77	38,62	38,29

**Tabel 4. Tegangan gagal 50% (50% SOV) konfigurasi batang-bola**

Frekuensi (kHz)	s=17-mm		s=25-mm	
	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)
10,0	32,22	30,16	51,94	47,82
20,0	31,62	29,63	52,23	46,54
31,0	29,75	27,73	49,55	44,59
47,5	30,14	28,00	50,06	44,12

**Tabel 5. Tegangan gagal 50% (50% SOV) konfigurasi bola-piring**

Frekuensi (kHz)	s=17-mm		s=25-mm	
	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)
10,0	39,87	41,47	54,40	57,17
20,0	40,08	40,81	55,45	56,75
31,0	38,33	39,22	52,70	54,86
47,5	38,03	39,03	52,34	54,43

Tabel 6. Tegangan gagal 50% konfigurasi piring-bola

Frekuensi (kHz)	s=25-mm	
	50% SOV (+, kV)	50% SOV (-, kV)
10,0	53,41	55,20
20,0	52,21	54,31
31,0	50,55	52,57
47,5	50,70	52,33

Dari tabel 3 sampai tabel 6 dihitung persentase kenaikan tegangan gagal 50% dengan pertambahan jarak sela 50% untuk setiap polaritas dan konfigurasi elektroda. Persentase pertambahan tegangan gagal 50% yang disimbolkan  $\Delta 50\%$  SOV merupakan perbandingan selisih nilai 50% SOV pada sela 25-mm dan 17-mm terhadap nilai 50% SOV sela 17-mm. Hasil perhitungan tertera pada Tabel 7.

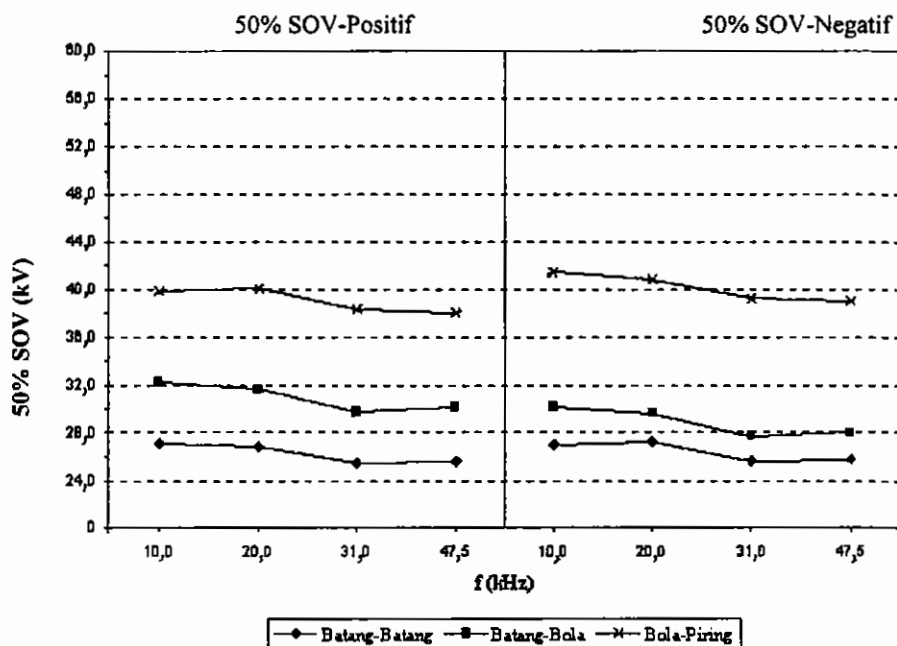
Tabel 7. Persentase pertambahan tegangan gagal 50% terhadap pertambahan jarak sela 50% ( $\Delta 50\%$  SOV)

f(kHz)	$\Delta 50\%$ SOV (dalam %) Polaritas Positif			$\Delta 50\%$ SOV (dalam %) Polaritas Negatif		
	Ba-Ba	Ba-Bol	Bol-Pir	Ba-Ba	Ba-Bol	Bol-Pir
10,0	47,97	61,20	36,44	48,24	58,55	37,86
20,0	49,98	65,18	38,35	49,39	57,07	39,06
31,0	52,86	66,55	37,49	50,76	60,80	39,88
47,5	50,68	66,09	37,63	48,58	57,57	39,46

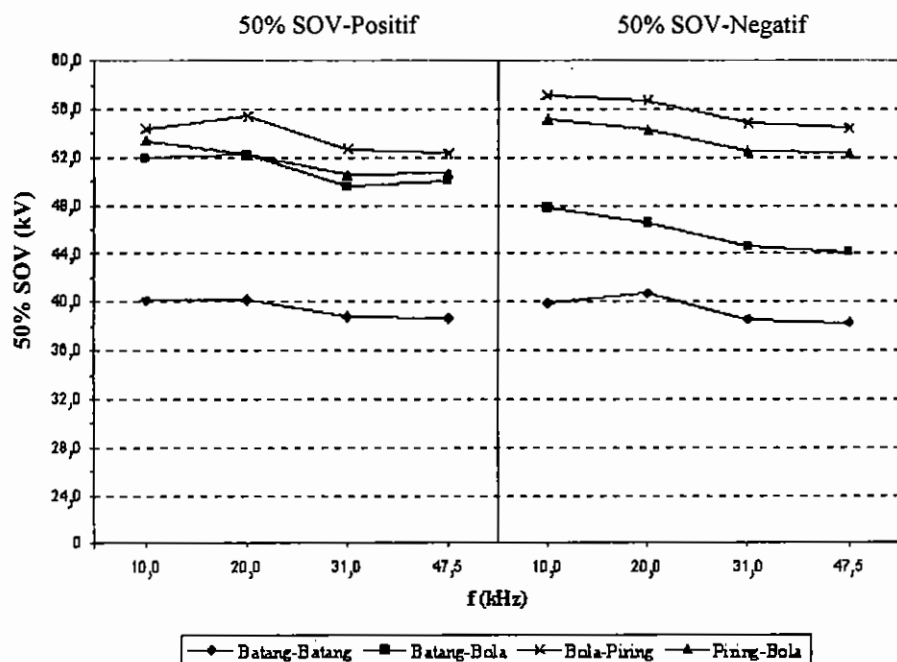
keterangan, Ba-Ba = elektroda batang-batang ; Ba-Bol = elektroda batang-bola

Bol-Pir = elektroda selabola-piring

Gambar 6 dan gambar 7 masing-masing merupakan gabungan tegangan gagal seluruh konfigurasi pada kedua polaritas.



Gambar 6. Grafik tegangan gagal 50% (50% SOV) seluruh konfigurasi untuk sela 17-mm



Gambar 7. Grafik tegangan gagal 50% (50% SOV) seluruh konfigurasi untuk sela 25-mm

Dari gambar 6 hingga gambar 7, dapat dilihat pokok-pokok penting berikut:

Gambar 6 dan gambar 7, untuk konfigurasi batang-batang memperlihatkan tegangan gagal 50% polaritas negatif yang sama dengan nilai positif-nya; sekaligus memiliki nilai-nilai 50% SOV terendah (untuk kedua polaritas).

Konfigurasi bola-piring memperlihatkan tegangan gagal 50% polaritas negatif yang lebih besar dari nilai positif-nya; sekaligus memiliki nilai-nilai 50% SOV terbesar (untuk kedua polaritas) dibandingkan dengan konfigurasi lainnya (ditunjukkan oleh gambar 6 dan gambar 7).

Pada gambar 6 dan gambar 7, untuk konfigurasi batang-bola diperlihatkan nilai 50% SOV polaritas positif yang lebih tinggi dari polaritas negatif-nya, dan terjadi pada kedua jarak sela

Dari gambar-gambar itu (gambar 6 dan gambar 7), tidak terdapat pola yang jelas (pola kelengkungan tertentu) dengan kenaikan frekuensi gelombang impuls berosilasi tunggal pada perubahan nilai tegangan gagal 50% sela udara. (Sebagai tambahan Pada tabel 7, konfigurasi batang-bola menunjukkan nilai persentase pertambahan 50% SOV terbesar dibandingkan konfigurasi lainnya.

Nilai tegangan gagal antara kedua polaritas yang hampir sama pada konfigurasi batang-batang disebabkan oleh pengaruh bentuk geometri (dimensi fisis) yang (lebih) simetris.

Hasil tegangan gagal pada konfigurasi batang-bola umumnya memiliki kondisi yang sama dengan konfigurasi bola-piring, tetapi ternyata tegangan gagal polaritas negatif memiliki nilai yang lebih kecil daripada polaritas positifnya. Keadaan ini merupakan pengecualian yang mungkin terjadi. Ada beberapa penelitian yang mendukung hal ini (Feser, 1971; Chowdhuri dkk). Untuk udara pada tekanan tinggi, hal ini dapat terjadi karena dengan terpaan tegangan polaritas negatif, terdapat atau terjadi korona pada elektroda yang ditanahkan Kondisi ini dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu bentuk gelombang surja terpaan (*waveshape*), bentuk elektroda, susunan geometris elektroda, dan jarak sela udara.

Tidak terdapat pola yang tegas (pola dengan suatu kelengkungan tertentu), pada perubahan nilai tegangan gagal 50% sela udara dengan kenaikan frekuensi gelombang surja berosilasi satu arah. Tidak adanya pola ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain rentang antara frekuensi gelombang yang tidak terlalu besar, jumlah osilasi gelombang surja tidak terlalu banyak dan jarak sela udara yang tidak terlalu besar. Jarak sela udara menentukan

pengaruh sifat osilasi gelombang dalam proses ionisasi/pelebaran pada udara.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan berikut.

1. Tidak terdapat pengaruh yang nyata peningkatan frekuensi dari 10 kHz ke 47,5 kHz terhadap tegangan gagal.
2. Konfigurasi sela batang-batang menunjukkan tegangan gagal terkecil dibandingkan dengan konfigurasi bola-piring.
3. Pada konfigurasi sela batang-bola ternyata tegangan gagal polaritas negatifnya lebih kecil dari pada polaritas positifnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A., 1994, *Teknik Tegangan Tinggi*, Cetakan ke-7, PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Chowdhuri, P., Mishra, A.K., Martin, P.M., McConnell, B., 1994, *The Effect of Non-Standard Lightning Voltage Waveshapes on the Impulse Strength of Short Air Gaps*, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, 1991-1999.
- Couper, I.A., Mejia, A., Ibrahim, M.b., 1988, *Testing Non-Uniform Gaps with Oscillatory Switching Surges*, IEEE Conference Publication Number 289 on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 93-96.
- Feser, K., 1971, *Influence of Corona Discharge on the Breakdown Voltage of Air Gaps*, Emil Haefely & Co, Ltd, Basel, Switzerland.
- Paris, L., Cortina, R., 1968, *Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings*, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-87, 947-957.